

1999 год

История и будущее полупроводниковых гетероструктур*

Ж. И. Алферов

Я глубоко признателен Демидовскому комитету за выбор меня для этой очень почетной награды – Демидовской премии 1999 г. в области физики.

Введение

Сейчас очень трудно представить современную физику твердого тела без полупроводниковых гетероструктур. Полупроводниковые гетероструктуры и особенно двойные гетероструктуры, включая квантовые ямы, нити и точки, являются сегодня предметом исследований 2/3 исследовательских групп в области физики полупроводников.

Если возможность управления типом проводимости полупроводника с помощью легирования различными примесями и идея инъекции неравновесных носителей заряда были теми семенами, из которых выросла полупроводниковая электроника, то гетероструктуры дают возможность решить значительно более общую проблему управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах: шириной запрещенной зоны, эффективными массами носителей и их подвижностями, показателем преломления, электронным энергетическим спектром и т. д.

Развитие физики и технологии полупроводниковых гетероструктур привело к значительным переменам в нашей повседневной жизни. Электронные устройства на основе гетероструктур широко используются во многих областях человеческой деятельности. Едва ли возможно вообразить нашу жизнь без телекоммуникационных систем, основанных на лазерах с двойной гетероструктурой (ДГС), без

гетероструктурных светодиодов и биполярных транзисторов, без малошумящих транзисторов с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ), применяющихся в высокочастотных устройствах, в том числе в системах спутникового телевидения. Лазер с ДГС присутствует теперь фактически в каждом доме в проигрывателе компакт-дисков. Солнечные элементы с гетероструктурами широко используются как для космических, так и для земных программ – космическая станция «Мир» уже почти 10 лет использует солнечные элементы на основе AlGaAs-гетероструктур.

Наш интерес к полупроводниковым гетероструктурам не был случаен. Систематическое изучение полупроводников было начато в начале 30-х гг. в Физико-техническом институте под прямым руководством его основателя Абрама Федоровича Иоффе.

В 1932 г. В. П. Жузе и Б. В. Курчатov исследуют собственную и примесную проводимость полупроводников. В том же году А. Ф. Иоффе и Я. И. Френкель создают теорию выпрямления тока на контакте металл–полупроводник, основанную на явлении туннелирования. В 1931 и 1936 гг. Я. И. Френкель публикует свои знаменитые статьи, где он предсказал экситонные эффекты, дал имя и разработал теорию экситонов в полупроводниках. Впоследствии экситоны были экспериментально обнаружены Е. Ф. Гроссом в 1951 г. Первая диффузионная теория выпрямляющего *n-p*-гетероперехода, которая легла в основу теории *n-p*-перехода В. Шокли, была опубликована Б. И. Давыдовым в 1939 г. По инициативе А. Ф. Иоффе с конца 40-х гг. в Физико-техническом институте были начаты исследования в области интерметаллических соединений. Теоретическое предсказание и экспериментальное открытие свойств полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ были сделаны независимо Г. Велькером и Н. А. Горюновой и А. Р. Регелем в Физико-техническом институте. Мы почерпнули очень много из того высокого теоретического, технологического и экспериментального уровня исследований, который существовал в ФТИ в то время.

Классические гетероструктуры

Идея использования гетероструктур в полупроводниковой электронике была выдвинута уже на заре развития электроники. Уже в первом патенте, связанном с транзисторами на *n-p*-переходах, В. Шокли предложил использовать широкозонный эмиттер, чтобы получить одностороннюю инжекцию. В нашем институте А. И. Губанов впервые теоретически проанализировал вольт-амперные характеристики изо-

типных и анизотипных гетеропереходов, однако одни из самых важных теоретических изысканий на этой ранней стадии исследования гетероструктур были выполнены Г. Кремером, который ввел понятие квазиэлектрических и квазимагнитных полей в плавном гетеропереходе и предположил, что гетеропереходы могли бы иметь чрезвычайно высокую эффективность инжекции по сравнению с гомопереходами. В то же самое время развивались различные идеи относительно использования полупроводниковых гетероструктур в солнечных элементах.

Следующий важный шаг был сделан несколькими годами позже, когда независимо друг от друга нами и Г. Кремером была сформулирована концепция лазеров на основе ДГС. В нашем патенте мы отметили возможность достигнуть высокой плотности инжектированных носителей и инверсной заселенности с помощью «двойной» инжекции. Мы особо указали на то, что лазеры на гомопереходах «не обеспечивают непрерывного режима генерации при повышенных температурах», и как дополнительное преимущество ДГС лазеров мы рассмотрели возможности «увеличения излучающей поверхности и использования новых материалов для получения излучения в различных областях спектра».

В своей статье Г. Кремер предложил использовать ДГС для ограничения носителей в активной области. Он предположил, что «с помощью пары гетеропереходных инжекторов лазерная генерация может быть осуществлена во многих непрямозонных полупроводниках и улучшена в прямозонных».

Первоначально теоретические изыскания продвигались существенно быстрее, чем их экспериментальная реализация. В 1966 г. мы предсказали, что плотность инжектированных носителей могла бы на несколько порядков превосходить плотность носителей в широкозонном эмиттере (эффект суперинжекции). В том же самом году в статье, посланной в новый советский журнал «Физика и техника полупроводников», я обобщил наше понимание основных преимуществ ДГС для различных устройств, особенно для лазеров и высокоомощных выпрямителей: «Области рекомбинации, светового излучения и инверсии населенности совпадают и полностью сосредоточены в среднем слое. Благодаря потенциальным барьерам на границе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, даже при больших смещениях в пропускном направлении целиком отсутствует сквозное токопрохождение электронов и дырок и рекомбинация в эмиттерах равна нулю (в отличие от гомоструктур $p-i-n$, $p-n-n^+$, $n-p-p^+$, где она играет определяющую роль).

Инверсия населенности для получения стимулированного излучения может быть достигнута чисто инъекционным способом (двойная инъекция), и для ее достижения не требуется высокого уровня легирования средней области и тем более вырождения. Вследствие заметной разницы в диэлектрических постоянных свет полностью сосредоточен в среднем слое, играющем роль высококачественного волновода, и, таким образом, световые потери в пассивных областях (эмиттерах) отсутствуют».

Вот наиболее важные преимущества полупроводниковых гетероструктур, которые мы выделили в то время:

- суперинжекция носителей,
- оптическое ограничение,
- электронное ограничение.

Теперь осталось только найти гетероструктуру, где эти явления могли бы быть реализованы.

В то время имел место общий скептицизм относительно возможности создания «идеального» гетероперехода с бездефектной границей и тем более с теоретически предсказываемыми свойствами инъекции. Даже пионерские работы Р. Л. Андерсона по исследованию первого эпитаксиального монокристаллического гетероперехода с совпадающими постоянными кристаллической решетки Ge–GaAs не давали доказательств инъекции неравновесных носителей в гетероструктурах. Фактическая реализация эффективных широкозонных эмиттеров рассматривалась попросту как невозможная, и патент лазера на ДГС многими рассматривался как «бумажный патент».

Главным образом из-за этого общего скептицизма существовало только несколько групп, пытавшихся найти «идеальную» пару, что являлось, конечно, трудной задачей. Должно было быть выполнено много условий совместимости тепловых, электрических, кристаллохимических свойств контактирующих материалов, а также их кристаллической и зонной структур.

Удачная комбинация ряда свойств, т. е. малые эффективные массы и большая ширина запрещенной зоны, эффективная излучательная рекомбинация и резкий край оптического поглощения вследствие «прямой» зонной структуры, высокая подвижность электронов в абсолютном минимуме зоны проводимости и ее сильное уменьшение в ближайшем минимуме в точке (100), уже в то время обеспечивала для GaAs достойное место в физике полупроводников и электронике. Так как максимальный эффект может быть получен при использовании гетероперехода между полупроводником, выступающим в качестве

активной области приборов, и более широкозонным материалом, наиболее перспективными системами, рассматривавшимися в то время, были GaP-GaAs и AlAs-GaAs. Для «совместимости» материалы «пары» должны удовлетворять первому и самому важному условию: необходимы наиболее близкие значения постоянных решеток. Поэтому гетеропереходы в системе AlAs-GaAs были предпочтительнее. Однако для того чтобы начать работы по получению и исследованию свойств этих гетеропереходов, требовалось преодолеть некоторый психологический барьер. К тому времени AlAs был уже давно получен, но многие свойства этого соединения оставались неисследованными, так как было известно, что AlAs является химически нестабильным и разлагается во влажной атмосфере. Возможность получения устойчивого и приспособленного для практических приложений гетероперехода в этой системе казалась малоперспективной.

Первоначально наши попытки создать ДГС были связаны с решеточно-несогласованной системой GaAsP. Мы успешно изготовили первые лазеры на основе ДГС в этой системе методом газофазной эпитаксии (ГФЭ). Однако из-за несоответствия параметров решетки лазерная генерация, как и в лазерах на гомопереходах, могла осуществляться только при температуре жидкого азота. Любопытно отметить, однако, что это был первый практический результат для решеточно-несогласованной и даже частично релаксировавшей структуры.

Наш опыт, который мы получили при изучении системы GaAsP, был очень важен для понимания многих специфических физических свойств гетеропереходов и основ гетероэпитаксии. Разработка метода многокамерной ГФЭ для системы GaAsP позволила нам в 1970 г. создать структуры со сверхрешетками с периодом 200 Å и продемонстрировать расщепление зоны проводимости на мини-зоны.

Однако к концу 1966 г. мы пришли к выводу, что даже небольшое несоответствие параметров решеток в гетероструктурах $\text{GaP}_{0.15}\text{As}_{0.85}$ -GaAs не позволяет реализовать потенциальные преимущества ДГС. В то время сотрудник моей группы Д. И. Третьяков сообщил мне, что с мелкими кристаллами твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различных составов, полученными два года назад путем охлаждения из расплава и положенными А. С. Борщевским в ящик стола, ничего за это время не случилось. Тотчас же стало ясно, что твердые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ являются химически устойчивыми и подходящими для изготовления долгоживущих гетероструктур и приборов. Изучение фазовых диаграмм и кинетики роста в этой системе, а также разработка модификации метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), пригодной для

роста гетероструктур, вскоре привели к созданию первой решеточно-согласованной AlGaAs-гетероструктуры. Когда мы опубликовали первую работу на эту тему, мы были счастливы считать себя первыми, кто обнаружил уникальную, фактически идеальную гетероструктуру – решеточно-согласованную систему для GaAs, но, как часто случается, одновременно и независимо те же самые результаты были достигнуты Х. Руппрехтом и Дж. Вудолом в исследовательском центре им. Т. Уотсона корпорации IBM.

Дальнейший прогресс в области полупроводниковых гетероструктур был стремительным. Прежде всего мы экспериментально подтвердили уникальные инжекционные свойства широкозонных эмиттеров и эффект суперинжекции, продемонстрировали стимулированное излучение в AlGaAs-ДГС, установили зонную диаграмму $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs-гетероперехода, тщательно изучили люминесцентные свойства и диффузию носителей в плавном гетеропереходе, а также чрезвычайно интересные особенности тока через гетеропереход, например, диагональные туннельно-рекомбинационные переходы непосредственно между дырками из узкозонной и электронами из широкозонной составляющих гетероперехода.

В это же самое время мы создали большинство наиболее важных приборов, в которых были реализованы основные преимущества гетероструктур:

- низкопороговые ДГС-лазеры при комнатной температуре (рис. 1),
- высокоэффективные светодиоды на одиночной гетероструктуре (ОГС) и на ДГС,
- солнечные элементы на гетероструктурах,
- биполярные транзисторы на гетероструктурах,
- тиристорные p - n - p -переключатели на гетероструктурах.

Большинство этих результатов было воспроизведено в других лабораториях в течение года – двух лет, а в некоторых случаях даже позже. Но в 1970 г. международная конкуренция стала очень сильной. Позже один из наших основных конкурентов И. Хаяши, который работал вместе с М. Панишем в лаборатории корпорации «Bell Telephone» в Мюррэй-Хилл, писал: «В сентябре 1969 г. Жорес Алферов из Института Иоффе в Ленинграде посетил нашу лабораторию. Мы узнали, что он уже получил $J_{th}^{(300)} = 4.3 \text{ кА/см}^2$ на ДГС. До этого мы не осознавали, что конкуренция настолько плотная, и удвоили наши усилия... О непрерывном режиме лазерной генерации при комнатной температуре было сообщено в мае 1970...» В нашей статье, посланной

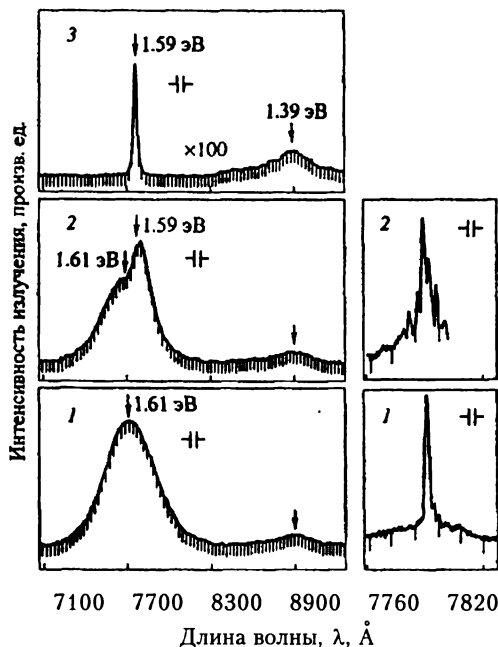


Рис. 1. Спектр генерации первого низкогопорогового $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ДГС лазера, работающего при комнатной температуре (300 K). $J_{th} = 4300 \text{ A/cm}^2$. Ток возрастает от 0.7 A (1) до 8.3 A (2) и 13.6 A (3) [22]

в печать в мае 1970 г., непрерывный режим лазерной генерации был реализован в лазерах с полосковой геометрией, для формирования которых была использована фотолитография и установленных на медных теплоотводах, покрытых серебром (рис. 2). Самая низкая плотность порогового тока J_{th} при 300 K была 940 A/cm^2 для широких лазеров и 2.7 kA/cm^2 для полосковых лазеров. Независимо от нас о непрерывном режиме лазерной генерации в ДГС-лазерах было сообщено Ицую Хаяши и Мортеном Панишем (для широких лазеров с алмазным теплоотводом) в статье, посланной только на один месяц позже, чем наша. Достижение режима непрерывной лазерной генерации при комнатной температуре вызвало взрыв интереса к физике и технологии полупроводниковых гетероструктур. Если в 1969 г. AlGaAs -гетероструктуры изучались только в нескольких лабораториях, в основном в СССР (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, «Полус» и «Квант» –

промышленные лаборатории, где мы внедряли наши технологии для прикладных программ) и в США (Bell Telephone, D. Sarnoff RCA Research Center, T. Watson IBM Res. Center), то в начале 1971 г. многие

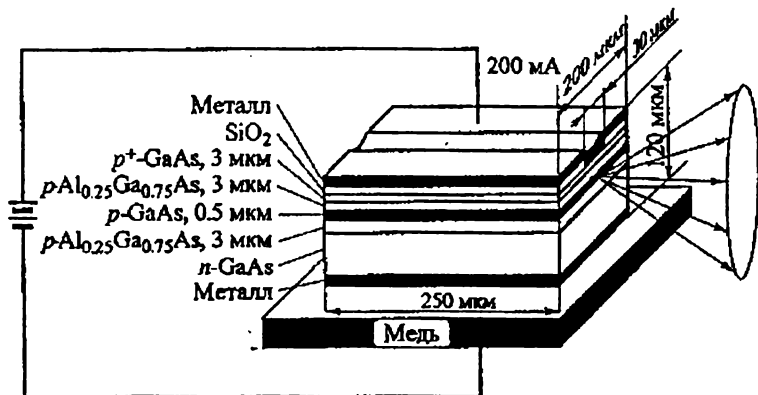


Рис. 2. Схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре

университеты, промышленные лаборатории в США, СССР, Великобритании, Японии, а также в Бразилии и Польше начали исследования гетероструктур и приборов с ними на основе соединений $A^{III}B^V$.

На этой ранней стадии развития физики и технологии гетероструктур стало ясно, что для расширения спектральной области нам необходимо искать новые решеточно-согласованные гетероструктуры. Первый важный шаг был осуществлен в нашей лаборатории в 1970 г.: мы установили, что возможно получение различных решеточно-согласованных гетеропереходов с использованием четверных твердых растворов $A^{III}B^V$, позволяющих независимо менять постоянную решетки и ширину запрещенной зоны. Позже к тем же самым выводам пришел Г. Антипас с сотр. Как практический пример, использующий эту идею, мы рассмотрели различные составы $InGaAsP$, и скоро этот материал стал одним из наиболее важных для множества прикладных задач: фотокатоды и особенно лазеры в инфракрасной области для волоконно-оптической связи и в видимом диапазоне.

Основные идеи относительно полупроводникового лазера с распределенной обратной связью (РОС) были сформулированы нами в авторском свидетельстве в 1971 г. В том же самом году Х. Когельник

и К. В. Шэнк рассмотрели возможность замены резонатора Фабри–Перо или подобных ему в лазерах на красителях на периодические объемные неоднородности. Необходимо отметить, что их подход неприменим к полупроводниковым лазерам, и все исследователи полупроводниковых лазеров с РОС или с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) используют следующие идеи:

1) дифракционная решетка создается не в объеме, а на поверхности волноводного слоя;

2) взаимодействие волноводных мод с поверхностной дифракционной решеткой приводит не только к распределенной обратной связи, но и дает на выходе хорошо сколламированное излучение.

Подробный теоретический анализ работы полупроводникового лазера с поверхностной дифракционной решеткой был выполнен в 1972 г., его авторами была установлена возможность одномодовой генерации. Первые полупроводниковые лазеры с поверхностной дифракционной решеткой и распределенной обратной связью были получены практически одновременно в Физико-техническом институте, Калтехе и Лаборатории корпорации Хехо в Пало Альто.

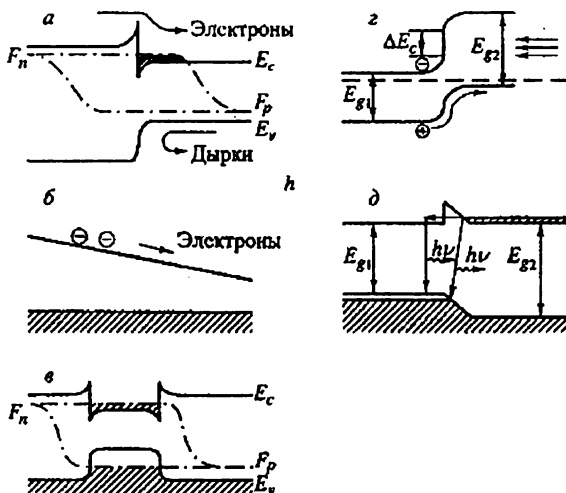


Рис. 3. Основные физические явления в классических гетероструктурах: *a* – односторонняя инжекция и сверхинжекция; *б* – диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле; *в* – электронное и оптическое ограничение; *г* – эффект широкозонного окна; *д* – диагональное туннелирование через гетерограницу

В начале 80-х гг. Г. Кремер и Г. Гриффитс опубликовали работу, стимулировавшую повышенный интерес к гетероструктурам со ступенчатой структурой зон (гетеропереходы II рода). Пространственное разделение электронов и дырок на таких гетерограницах позволяет в широких пределах управлять их оптическими свойствами. Ступенчатая структура зон дает возможность получить оптическое излучение с энергией фотона, много меньшей ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, формирующих гетеропереход. Реализация инжекционного лазера на основе гетеропереходов II рода в системе GaInAsSb-GaSb открыла хорошие перспективы для создания эффективных когерентных источников света в инфракрасном оптическом диапазоне. Излучение в структурах такого типа возникает за счет рекомбинации электронов и дырок, локализованных в самосогласованных потенциальных ямах, расположенных по разные стороны от гетерограницы. Таким образом, гетероструктуры II рода открывают новые возможности как в фундаментальных исследованиях, так и для приборных применений, реализация которых на гетероструктурах I рода в системе соединений $A^{III}B^V$ невозможна. Однако практическое использование гетероструктур II рода до сих пор лимитируется недостаточным пониманием их фундаментальных свойств и ограниченным числом экспериментально исследованных систем.

Кратко сформулируем и классифицируем наиболее важные результаты развития классических гетероструктур следующим, удобным, на наш взгляд, способом.

I. Фундаментальные физические явления (рис. 3):

- Односторонняя инжекция.
- Сверхинжекция.
- Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
- Электронное ограничение.
- Оптическое ограничение.
- Эффект широкозонного окна.
- Диагональное туннелирование через гетерограницу.

II. Важные следствия для применения в полупроводниковых приборах:

– Низкопороговые полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, лазеры с распределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими зеркалами, поверхностно-излучающие лазеры, инфракрасные лазеры на гетероструктурах II рода.

- Высокоэффективные светоизлучающие диоды.

- Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна.
- Полупроводниковая интегральная оптика, основанная на полупроводниковых РОС- и РБЗ-лазерах,
- Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером.
- Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала.
- Мощные диоды и тиристоры.
- Преобразователи света из инфракрасного в видимый диапазон.
- Эффективные холодные катоды.

III. Важные технологические особенности:

- Принципиальная необходимость структур с хорошим согласованием параметров решетки.
- Многокомпонентные твердые растворы используются для согласования параметра решетки.
- Принципиальная необходимость эпитаксиальных технологий выращивания.

В заключение этого краткого обзора раннего развития «объемных» гетероструктур можно сказать, что создание «идеального» гетероперехода и введение концепции гетероструктуры в физику и технологию полупроводников привело к открытию новых физических эффектов, кардинальному улучшению характеристик фактически всех известных и созданию новых типов полупроводниковых приборов.

Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками

Благодаря наличию электронного ограничения, в ДГС-лазеры на основе двойных гетероструктур по существу стали прямыми предшественниками структур с квантовыми ямами, в которых средний узкозонный слой имеет толщину порядка нескольких сотен ангстрем, что приводит к расщеплению электронных уровней вследствие эффектов размерного квантования. Однако лишь с развитием новых методов выращивания гетероструктур стала возможной реализация высококачественных двойных гетероструктур со сверхтонкими слоями. В 70-е гг. были разработаны два основных современных метода эпитаксиального роста с прецизионным контролем толщины, планарности, состава и т. д. Метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) превратился сегодня в одну из важнейших технологий для выращивания гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$ прежде всего благодаря пионерской работе А. Чо. Основные идеи метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ) были изложены в ранней

работе Г. Манасевита. Этот метод нашел широкое применение для выращивания гетероструктур соединений $A^{III}B^V$, в особенности после сообщения Р. Дююи и П. Дапкуса о получении с его помощью инжекционного ДГС лазера в системе AlGaAs, работающего при комнатной температуре.

Четкое проявление эффектов размерного квантования в оптических спектрах полупроводниковой гетероструктуры GaAs-AlGaAs со сверхтонким слоем GaAs (квантовой ямой) было продемонстрировано Р. Динглом и др. в 1974 г. Авторы наблюдали характерную ступенчатую структуру в спектрах поглощения и систематический сдвиг характеристических энергий при уменьшении толщины квантовой ямы (КЯ).

Экспериментальное изучение сверхрешеток началось в 1970 г. с работы Л. Есаки и Р. Тсу, которые рассмотрели электронный транспорт в сверхрешетке, т. е. в структуре с дополнительным периодическим потенциалом, создаваемым легированием или изменением состава полупроводниковых материалов с периодом, большим, но сравнимым с постоянной кристаллической решетки. В этом, как его назвал Лео Есаки, «man-made crystal» происходит расщепление параболических зон в мини-зоны, разделенные малыми запрещенными энергетическими зонами и имеющие зону Бриллюэна, определяемую периодом сверхрешетки. Аналогичные идеи были сформулированы Л. В. Келдышем еще в 1962 г. при рассмотрении периодического потенциала, создаваемого на поверхности полупроводника интенсивной ультразвуковой волной. В начале 70-х гг. в Физико-техническом институте Р. Казаринов и Р. Сулис теоретически рассмотрели прохождение тока в структурах со сверхрешетками. Они показали, что протекание тока определяется туннелированием через разделяющие ямы потенциальные барьеры. Ими также были предсказаны очень важные физические явления: туннелирование носителей под действием электрического поля, когда основное состояние одной ямы совпадает с возбужденным состоянием следующей ямы, и стимулированное излучение, возникающее при туннелировании оптически возбужденных носителей из основного состояния одной ямы в возбужденное состояние соседней, расположенное ниже по энергии за счет действия приложенного электрического поля. Практически в то же время Л. Есаки и Р. Тсу независимо рассмотрели эффекты резонансного туннелирования в структурах со сверхрешетками.

Впервые экспериментальные исследования структур со сверхрешетками были выполнены Л. Есаки и Р. Тсу на сверхрешетках в

системе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ -GaAs, полученных методом ГФЭ. В нашей лаборатории к тому времени мы разработали первую многокамерную установку и, как было упомянуто ранее, изготовили структуры со сверхрешетками $\text{GaP}_{0.3}\text{As}_{0.7}$ -GaAs с толщиной каждого из слоев 100 \AA и общим количеством слоев, равным 200. Наблюдаемые особенности вольт-амперных характеристик, их температурные зависимости и эффект фотопроводимости были объяснены расщеплением зоны проводимости за счет действия одномерного периодического потенциала сверхрешетки. Эти первые сверхрешетки являлись в то же время и первыми сверхрешетками с напряженными слоями. Е. Блэкли и Дж. Мэттьюз, работавшие с Л. Есаки и Р. Тсу в IBM, в середине 70-х гг. достигли заметных успехов в выращивании напряженных сверхрешеток с очень низкой концентрацией дефектов. Но только намного позднее, после теоретической работы Г. Осборна из Sandia lab. и выращивания первой высококачественной напряженной сверхрешетки $\text{GaAs-In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ М. Людовицем в Varian, Н. Холоньяку из Иллинойского университета удалось создать на основе этих структур лазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре. Стало понятно, что в сверхрешетках с напряженными слоями напряжение решетки является дополнительной степенью свободы и, варьируя толщины и составы слоев, можно изменять непрерывно и независимо друг от друга такие фундаментальные параметры, как ширина запрещенной зоны, постоянная решетки и т. д.

В начале 70-х гг. Л. Есаки с сотрудниками применили технологию МПЭ к системе AlGaAs, и в марте 1974 г. они представили работу по резонансному туннелированию. Это была первая экспериментальная демонстрация новых физических свойств гетероструктур с квантовыми ямами. Были измерены зависимости туннельного тока и проводимости от приложенного напряжения в гетероструктуре GaAs-GaAlAs с двойным барьером (рис. 4) и обнаружены максимумы тока, связанные с резонансным туннелированием. Позже, в том же году, Л. Есаки и Л. Л. Ченг наблюдали эффект резонансного туннелирования в сверхрешетке. Усиленное внимание к резонансному туннелированию, очевидно, было также связано с потенциальными возможностями применения этого эффекта в быстродействующей электронике. В конце 80-х гг. для двойного резонансного туннельного диода удалось достигнуть пикосекундного диапазона времени переключения; в резонансно-туннельных диодах на GaAs были получены осцилляции на частоте 420 ГГц при комнатной температуре.

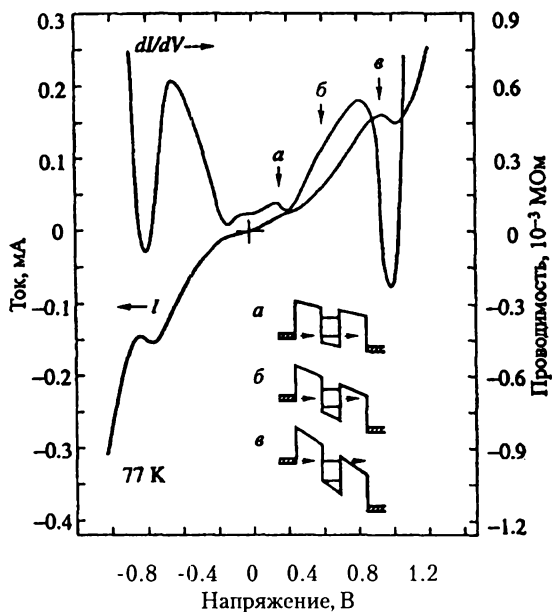


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика и характеристика проводимость–напряжение двухбарьерной GaAs-GaAlAs-структуры. Резонансные (а, е) и нерезонансные (б) условия показаны стрелками на вставке (согласно Л. Л. Ченгу, Л. Есаки, Р. Тсу)

Утверждение о переходе к двумерному движению электронов в полевых транзисторах было высказано уже достаточно давно и для электронов, захваченных в инверсном слое, впервые проверено А. Б. Фаулером и др. в 1966 г. в экспериментах по магнитопроводимости. Спектральные эффекты, обусловленные пространственным квантованием, наблюдались в тонких пленках висмута В. Н. Луцким и Л. А. Куликом в 1968 г.

Первая работа по модулированно-легированным сверхрешеткам, где было продемонстрировано увеличение подвижности по сравнению с объемными кристаллами, стимулировала развитие исследований по использованию двумерного электронного газа с высокой подвижностью для микроволнового усиления. Во Франции и Японии практически одновременно на основе одиночной модулированно-легированной гетероструктуры $n\text{-AlGaAs-}n\text{-GaAs}$ были созданы новые типы транзисторов, получившие название TEGFET (полевые транзисторы

с двумерным электронным газом) во Франции и НЕМТ (транзисторы с высокой подвижностью электронов – ВПЭТ) в Японии.

Впервые лазерная генерация на квантовых ямах была получена Дж. П. ван дер Зилом и др., но параметры генерации значительно уступали средним ДГС-лазерам. Лишь в 1978 г. Р. Дюкюи и П. Даккус в сотрудничестве с Н. Холоньяком впервые сообщили о создании лазера на квантовой яме с параметрами, сравнимыми со стандартными ДГС-лазерами. В их работе впервые прозвучало название «квантовая яма». Реальное преимущество лазеров на квантовых ямах было продемонстрировано намного позже В. Т. Цангом из «Bell Telephone lab». За счет значительного улучшения технологии МПЭ роста и создания оптимизированной структуры (РО ДГС с плавным изменением показателя преломления волноводной области: РО ПИПП ДГС) удалось добиться снижения пороговой плотности тока до 160 А/см^2 .

В Физико-техническом институте развитие методов МПЭ и МОС ГФЭ выращивания гетероструктур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{IV}}$ было начато только в конце 70-х гг. Прежде всего мы стимулировали разработку и конструирование первой советской установки молекулярно-пучковой эпитаксии в нашей электронной промышленности. В течение нескольких лет были разработаны три поколения машин для МПЭ, и последние из них, имевшие название «Цна» (красивая река вблизи Рязани – города, где находился Научно-исследовательский технологический институт электронной промышленности – НИТИ; в НИТИ и была выполнена разработка установок МПЭ), оказались достаточно хороши для реализации научных программ. Чуть позже параллельно мы начали разрабатывать системы МПЭ в НТО АН – в Ленинграде. В середине 80-х гг. несколько систем этой версии были получены в ФТИ. Оба типа систем МПЭ все еще работают в ФТИ и других лабораториях страны.

Системы МОС ГФЭ мы разработали в нашем институте, а позже, в 80-е гг., шведская компания «Eriqur» специально сконструировала при нашем активном участии пару систем для нашего института, которые до сих пор используются в научных исследованиях.

Большой интерес к изучению низкоразмерных структур и отсутствие оборудования для технологий роста МПЭ и МОС ГФЭ стимулировали наши исследования по развитию метода ЖФЭ, пригодного для выращивания гетероструктур с квантовыми ямами.

Однако до конца 70-х гг. казалось невозможно вырастить гетероструктуры $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{IV}}$ с толщиной активной области менее 500 \AA методом ЖФЭ из-за существования вблизи гетеропереходов протяженных переходных областей переменного химического состава.

Ситуация изменилась благодаря работе Н. Холодняка и др., предложивших для выращивания сверхрешеток на основе соединений InGaAsP использовать систему ЖФЭ с вращающимися «лодочками». В нашей лаборатории мы разработали модифицированный метод ЖФЭ с обычным последовательным перемещением подложки в стандартной горизонтальной геометрии «лодочки» для InGaAsP -гетероструктур и метод низкотемпературной ЖФЭ для AlGaAs -гетероструктур. Эти методы позволили нам выращивать гетероструктуры с квантовыми ямами превосходного качества практически любого вида с толщиной активной области до 20 \AA и с размером переходных областей, сравнимым с постоянной кристаллической решетки (рис. 5). Важное практическое значение имело получение методом ЖФЭ рекордных значений пороговых плотностей тока в лазерах с разделным ограничением и одиночной квантовой ямой на основе гетероструктур $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ ($A = 1.3$ и 1.55 мкм) и $\text{InGaAsP}/\text{GaAs}$ ($L = 0.65\text{--}0.9 \text{ мкм}$). Для мощных лазеров $\text{InGaAsP}/\text{GaAs}$ ($A = 0.8 \text{ мкм}$) (рис. 6), выполненных в полосковой геометрии, были достигнуты в непрерывном режиме эффективность 66 % и мощность излучения 5 Вт при ширине полоска 100 мкм. В этих лазерах впервые было реализовано эффективное охлаждение мощного полупроводникового прибора за счет рекомбинационного излучения, как было предсказано ранее.

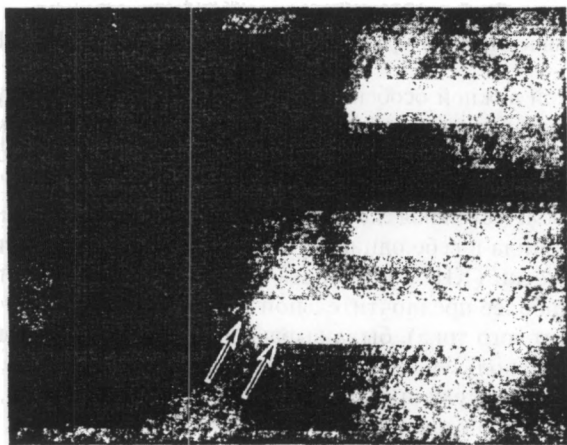


Рис. 5. Тонкий InGaAsP -слой в структуре $\text{InGaP}/\text{InGaAsP}/\text{InGaP}/\text{GaAs}$ с квантовой ямой, выращенной методом ЖФЭ. Изображение получено методом ПЭМ с торца

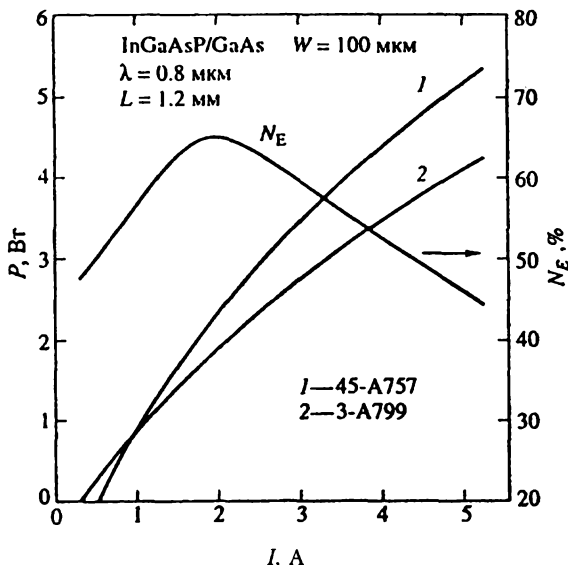


Рис. 6. Ватт-амперные характеристики РО ДГС лазерных диодов InGaAsP-GaAs с одиночной квантовой ямой в непрерывном режиме:

1 – диод с сильно и слабо отражающими покрытиями; 2 – диод только с сильно отражающими покрытиями.

$N_E(I)$ – зависимость коэффициента преобразования энергии (КПД) от тока

Другой важной особенностью InGaAsP-гетероструктур явилась их довольно большая устойчивость к развитию дислокации и дефектов (рис. 7). Данные исследования положили начало широкому применению гетероструктур, не содержащих алюминия.

Наиболее сложная лазерная структура с квантовыми ямами, которая соединила в себе одиночную квантовую яму и короткопериодные сверхрешетки (КПСР), использовавшиеся для создания РО ПИПП ДГС (наиболее предпочтительной для получения наименьших значений порогового тока), была выращена в нашей лаборатории в 1988 г. (рис. 8). Используя КПСР, удалось не только достигнуть желаемого профиля показателя преломления в волноводной области, создать барьер движению дислокации в активную область, но также получить возможность выращивать различные части структуры при существенно различных температурах. Таким образом, были достигнуты одновременно как превосходная морфология поверхности, так и высокая внутренняя квантовая эффективность на планарной поверхности GaAs (100).

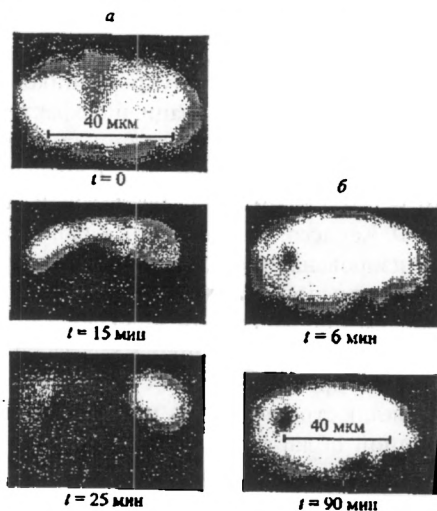


Рис. 7. Временная эволюция картин люминесценции из активной области в AlGaAs-GaAs (а) и InGaAsP-GaAs (б) РО ДГС с одиночной квантовой ямой при высоком уровне фотовозбуждения.

Диаметр пятна возбуждения Кг'-лазера ~ 40 мкм. Уровни возбуждения, Вт/см²:

а - 10^4 , б - 10^5

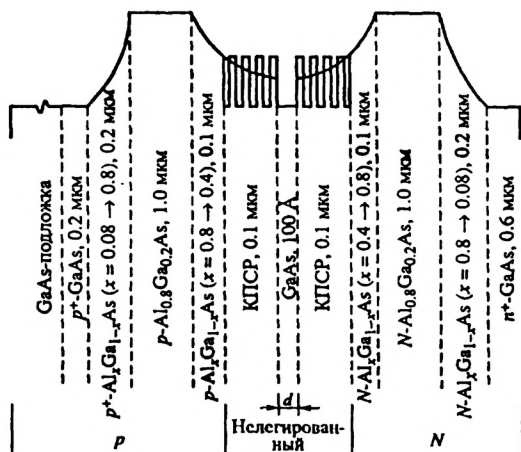


Рис. 8. Структура РО ДГС лазера с КЯ, ограниченной КПСР, выращенная методом МПЭ

Были получены значения пороговой плотности тока $J_{th} = 52 \text{ А/см}^2$ и после некоторой оптимизации $J_{th} = 40 \text{ А/см}^2$, которое до сих пор является мировым рекордом для полупроводниковых инжекционных лазеров и служит хорошей демонстрацией эффективного применения квантовых ям и сверхрешеток в электронных приборах.

Идея стимулированного излучения в сверхрешетках, выдвинутая Р. Казариновым и Р. Сурисом, была реализована почти на четверть столетия позже Ф. Капассо. Предложенная ранее структура была существенно оптимизирована, и каскадный лазер, разработанный Ф. Капассо, вызвал к жизни новое поколение униполярных лазеров, работающих в среднем инфракрасном диапазоне.

История развития полупроводниковых лазеров – это с определенной точки зрения история борьбы за снижение их порогового тока, что наглядно проиллюстрировано на рис. 9. Наиболее значительные изменения в данной области произошли только после внедрения концепции ДГС-лазеров. Использование КПСР КЯ привело фактически к достижению теоретического предела этого одного из наиболее важных параметров. Дальнейшие возможности, связанные с применением новых структур с квантовыми проволоками и квантовыми точками, будут обсуждаться в следующей части нашего доклада.

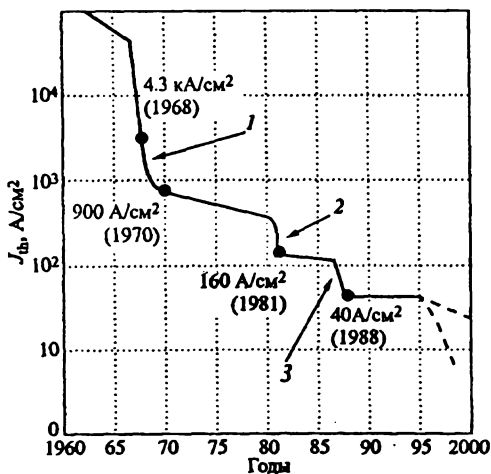


Рис. 9. Эволюция порогового тока полупроводниковых лазеров.

Цифрами обозначены резкие снижения порогового тока, обусловленные внедрением: 1 – двойных гетероструктур; 2 – гетероструктур с КЯ; 3 – гетероструктур с КЯ, ограниченной КПСР

Возможно, наиболее значительным открытием, связанным с исследованием квантовых ям, было открытие квантового эффекта Холла. Это открытие и всестороннее его изучение в AlGaAs-GaAs-гетероструктурах, приведшее вскоре к открытию дробного квантового эффекта Холла, оказало принципиальное влияние на всю физику твердого тела. Обнаружение данного эффекта, имеющего дело только с фундаментальными величинами и не зависящего от особенностей зонной структуры, подвижности и плотности носителей заряда в полупроводнике, показало, что гетероструктуры могут использоваться и для моделирования некоторых фундаментальных физических явлений. В последнее время большая часть исследований в этой области сконцентрирована на понимании механизма конденсации электронов и поиске вигнеровской кристаллизации.

Обобщим кратко основные положения данной части аналогично тому, как это было сделано в предыдущей, посвященной классическим гетероструктурам.

I. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами и сверхрешетками:

- Двумерный электронный газ.
- Ступенчатый вид функции плотности состояний.
- Квантовый эффект Холла.
- Дробный квантовый эффект Холла.
- Существование экситонов при комнатной температуре.
- Резонансное туннелирование в структурах с двойным барьером и сверхрешетках.

– Энергетический спектр носителей в сверхрешетках определяется выбором потенциала и упругих напряжений.

– Стимулированное излучение при резонансном туннелировании в сверхрешетках.

- Псевдоморфный рост напряженных структур.

II. Важные следствия для применения в полупроводниковых приборах:

– Более короткие длины волн излучения, меньшие значения порогового тока, большее дифференциальное усиление и более слабая температурная зависимость порогового тока в полупроводниковых лазерах.

- Инфракрасные квантовые каскадные лазеры.

- Лазер с КЯ, ограниченной КПСР.

– Оптимизация электронного и оптического ограничения и характеристик волновода в полупроводниковых лазерах.

- Транзисторы с двумерным электронным газом (ВПЭТ).
 - Резонансно-туннельные диоды.
 - Высокоточные стандарты сопротивлений.
 - Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы.
 - Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования:
- III. Важные технологические особенности:
- Нет необходимости в согласовании параметров решетки.
 - Принципиально необходимо использование технологий с низкими скоростями роста (МПЭ, МОС ГФЭ).
 - Метод субмонослойного выращивания.
 - Подавление распространения дислокации несоответствия в процессе эпитаксиального роста.
 - Резкое увеличение разнообразия материалов – компонентов гетероструктур.

Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками

В 80-е гг. прогресс в физике двумерных гетероструктур с квантовыми ямами и их прикладном применении привлек многих ученых к изучению систем, обладающих еще меньшей размерностью, – квантовых проволок и квантовых точек. В отличие от квантовых ям, где носители ограничены в направлении, перпендикулярном к слоям, и могут двигаться свободно в плоскости слоя, в квантовых проволоках носители заряда ограничены в двух направлениях и свободно перемещаются только вдоль оси проволоки. В квантовых точках (искусственных атомах) носители заряда ограничены уже во всех трех направлениях и обладают полностью дискретным энергетическим спектром. На рис. 10 показаны диаграммы функции плотности состояний для КЯ, квантовых проволок (КП) и квантовых точек (КТ).

Кроме экспериментальной работы по изготовлению и исследованию структур с КП, в те годы было проведено теоретическое исследование проблем, связанных с одним из наиболее интересных применений – лазером на КП. Авторы указывали на возможность ослабления температурной зависимости плотности порогового тока для КП лазера и на полную температурную стабильность лазеров на КТ. К настоящему времени в данной области уже имеется значительное число как теоретических, так и экспериментальных работ. Были исследованы транспортные и емкостные свойства КП, изучалось вертикальное и поперечное туннелирование в структурах с КП и КТ.

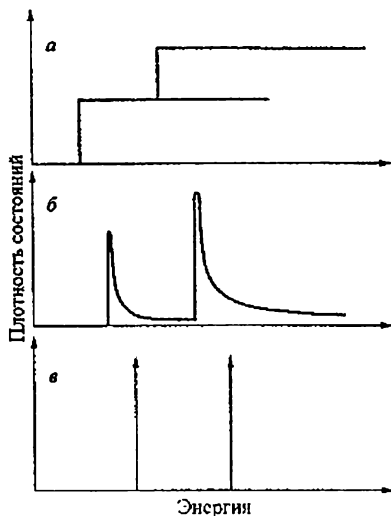


Рис. 10. Диаграммы функции плотности состояний для структур с квантовыми ямами (а), квантовыми проволоками (б) и квантовыми точками (в)

В лазерных КП-структурах были выполнены измерения фотолюминесценции в дальней инфракрасной области спектра, изучены рамановские спектры, проведены измерения оптического усиления и исследования особенностей оптических свойств, особенно поляризационных эффектов. Однако до сих пор прогресс в этой области осуществляется весьма медленно, и реализация наиболее интересных способов применения структур с квантовыми проволоками все еще впереди.

Первые полупроводниковые точки – микрокристаллы соединений $A^{III}B^{VI}$, сформированные в стеклянной матрице, были предложены и реализованы А. И. Екимовым и А. А. Онущенко. Их работа инициировала важные теоретические исследования квантовых точек, начатые Ал. И. Эфросом и А. Л. Эфросом в Физико-техническом институте. Однако, поскольку полупроводниковые квантовые точки были внедрены в изолирующую стеклянную матрицу и качество гетерограницы между стеклом и полупроводниковой точкой было невысоким, это создавало определенные ограничения как для фундаментальных исследований, так и для приборных применений. Намного более интересные возможности появились с созданием трехмерных КГ, когерентных с окружающей их полупроводниковой матрицей.

Для изготовления этих структур было предложено несколько методов. Непрямые методы, к которым относится изготовление КП путем их поперечного вытравливания из структур с КЯ, часто страдают недостаточным разрешением и могут вызывать повреждение гетерограниц в процессе травления. Более перспективным способом является применение прямых методов изготовления, таких как рост в V-образных канавках и на гофрированных («корругированных») поверхностях, приводящих к образованию КП и КГ. Лаборатории Физико-технического института и Технического университета Берлина, проводя эти исследования в тесном сотрудничестве, значительно продвинулись именно в последнем направлении.

Сейчас мы пришли к выводу, что наиболее многообещающим методом формирования упорядоченных массивов КП и КТ является метод, использующий явление самоорганизации на кристаллических поверхностях. Релаксация напряжений на краях ступеней или граней может приводить к формированию упорядоченных массивов КП и КГ в случаях роста как согласованных, так и рассогласованных по параметру решетки материалов. Спонтанное формирование на кристаллических поверхностях различных упорядоченных структур, имеющих периодичность, намного большую параметра решетки, было предметом интенсивных теоретических исследований. Наша конечная цель – это изготовление идеальной полупроводниковой квантовой точки, которая подобно атому имела бы энергетический спектр, описываемый 5-функцией. Для наиболее полной реализации преимуществ этого подхода необходимо создать плотный и однородный массив проволок и точек, иначе неоднородное уширение может свести на нет достоинства пониженной размерности. Такие наноструктуры должны иметь размеры в диапазоне нескольких нанометров, чтобы обеспечить энергетические зазоры между подуровнями электронов и дырок порядка нескольких kT при комнатной температуре. Кроме того, они должны быть свободными от дислокации и дефектов.

Одним из механизмов формирования упорядоченных наноструктур является фасетирование, в котором плоская кристаллическая поверхность перестраивается в периодическую структуру «холмов и долин» для уменьшения свободной энергии на поверхности. Последующий гетероэпитаксиальный рост на фасетированных поверхностях при оптимизированных условиях роста может приводить к формированию гофрированных сверхрешеток.

К другому классу самоорганизованных структур, подходящих для изготовления КП и КТ, относят упорядоченные массивы сильно

напряженных «островков» монослойной высоты, спонтанно образующихся в процессе субмонослойного осаждения одного материала на другой, сильно рассогласованный с ним по параметру кристаллической решетки.

Недавно в системе InAs-GaAs очень однородные массивы трехмерных квантовых точек, имеющих также поперечное упорядочение, были получены с помощью методов роста как МПЭ, так и МОС ГФЭ, путем нанесения покрытий InAs толщиной более одного монослоя.

Движущей силой, вызывающей образование массива однородных напряженных островков на кристаллической поверхности, является релаксация упругих напряжений на краях граней и взаимодействие островков посредством напряжений, создаваемых ими в подложке. Эксперименты показывают в большинстве случаев довольно узкое распределение островков по размерам, и, более того, при некоторых условиях когерентные островки InAs образуют квазипериодическую квадратную решетку. Форма квантовых точек может значительно изменяться в процессе заравнивания, или постростового отжига, или при использовании сложных ростовых манипуляций. Короткопериодное попеременное нанесение различных напряженных материалов ведет к расщеплению КТ и формированию сверхрешеток, образуемых плоскостями вертикально связанных квантовых точек (рис. 11, 12).

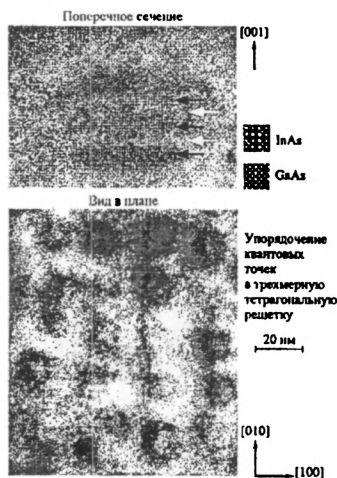


Рис. 11. Вертикальное и поперечное упорядочение связанных квантовых точек в системе InAs-GaAs

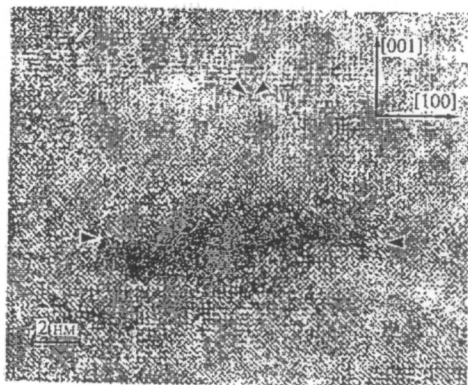


Рис. 12. Изображение одиночной квантовой точки при осаждении трех монослоев InAs, полученное методом ПЭМ с высоким разрешением с торца (границы показаны стрелками)

Как было обнаружено, энергия излучения из основного состояния КТ совпадает с краем поглощения и энергией лазерной генерации. Наблюдение сверхузких (< 0.15 мэВ) линий люминесценции из одиночных квантовых точек (рис. 13), которые не проявляют тенденции к рас-

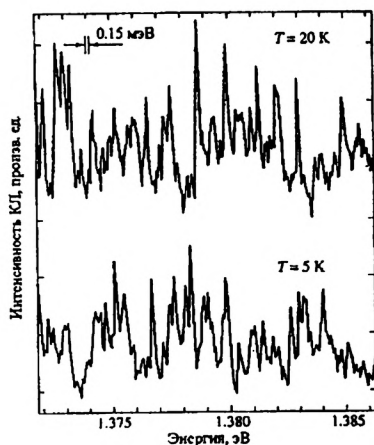


Рис. 13. Спектр катодолуминесценции (КЛ) высокого разрешения структур с КГ InAs-GaAs

ширению с увеличением температуры (рис. 14), является доказательством формирования КТ с энергетическим спектром, описываемым δ -функцией.

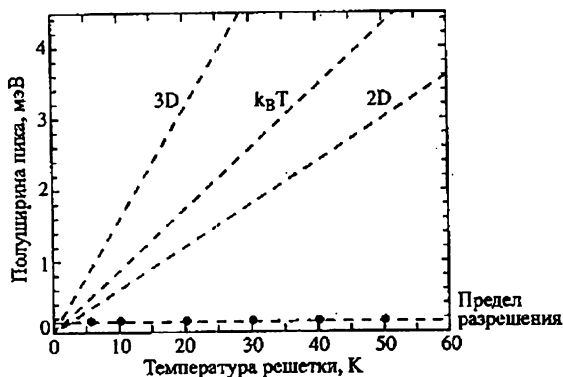


Рис. 14. Температурная зависимость полуширины пика (full width at half maximum) в спектре катодолюминесценции одиночной КТ

Лазеры на квантовых точках, как ожидается, будут иметь более высокие характеристики по сравнению со стандартными лазерами на КЯ. В них ожидается одновременное проявление таких уникальных черт, как высокое дифференциальное усиление, сверхнизкое значение пороговой плотности тока и высокая температурная стабильность пороговой плотности тока. В дополнение к этому упорядоченные массивы КТ, сформированные в области оптического волновода, могут привести к появлению распределенной обратной связи и (или) к стабилизации одномодового лазерного излучения. *In situ* захороненные в полупроводнике структуры с КТ пространственно локализуют носители и предотвращают их безызлучательную рекомбинацию на зеркалах резонатора. Таким способом можно избежать перегрева зеркал резонатора, являющегося одной из наиболее серьезных проблем высокоомощных и высокоэффективных AlGaAs-GaAs- и AlGaAs-InGaAs-лазеров.

В нашей первой публикации InGaAs-лазеры на КТ показали: 1) сверхвысокую температурную стабильность пороговой плотности тока с характеристической температурой (T_0) приблизительно 350–400 К в диапазоне температур 30–150 К и низкую пороговую плотность тока (120 А/см²) в диапазоне температур 70–150 К; 2) одномодовое лазерное излучение на продольной моде наблюдается как при

низких, так и при высоких температурах (300 К). Характеристическая температура ($T_0 = 350$ К) значительно превышает теоретический предел для лазера на КЯ.

Относительно малая разница энергий между основным состоянием экситона в КТ и смачивающего слоя (~ 100 мэВ) и между состояниями экситона в КТ и экситона в барьере GaAs (~ 200 мэВ) приводит к эффективной делокализации экситонов и носителей из КТ при высоких температурах (> 170 К). Как следствие T_0 уменьшается ($T_0 \cong 60$ К), энергия излучения сдвигается ближе к энергии экситона в смачивающем слое, а пороговая плотность тока возрастает до 950 А/см² при 300 К, чтобы компенсировать результирующую потерю усиления.

В лазерах, активная область которых получена в результате роста вертикально связанных массивов КТ (ВСМКТ) (рис. 15), осуществляемого посредством чередующегося короткопериодного осаждения

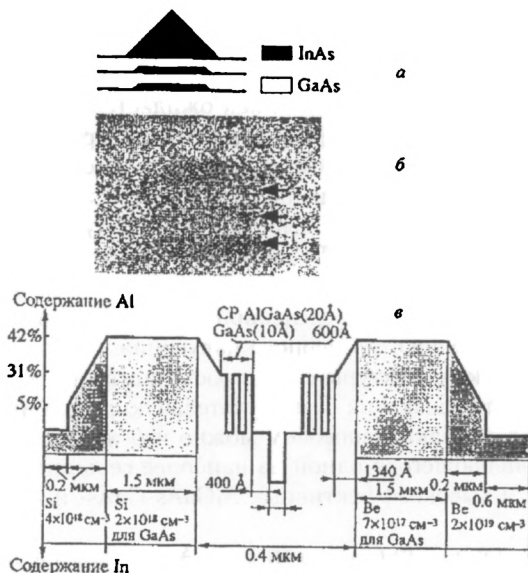


Рис. 15. Лазеры на вертикально связанных массивах квантовых точек: *a* – схематическое изображение трех вертикально связанных плоскостей InAs-GaAs-точек; *б* – изображение вертикально связанных квантовых точек, полученное методом ПЭМ с торца; *в* – схематическое изображение лазерной структуры

слоев GaAs-(InGa)As, наблюдается излучение через основное состояние при 300 К. Несмотря на дальнейшее увеличение T_0 ($T_0 = 430$ К в диапазоне температур 70–150 К) и уменьшение пороговой плотности тока ($J_{th} = 40$ А/см² при 80 К), J_{th} при комнатной температуре была все еще высока (660 А/см²) и T_0 оставалась равной 60 К. КТ InGaAs в этих лазерах были выращены внутри одиночной квантовой ямы GaAs в составе лазерной структуры с КПСР, упомянутой выше.

Для лазеров на КТ, выращенных методом МОС ГФЭ, была продемонстрирована сверхвысокая температурная стабильность ($T_0 = 530$ К в диапазоне температур 70–220 К). Вплоть до 220 К пороговая плотность тока составляла приблизительно 50 А/см² и практически не зависела от температуры. Дальнейшая оптимизация параметров роста и геометрии структуры позволила расширить диапазон сверхвысокой температурной стабильности порогового тока ($T_0 = 385$ К) вплоть до 50°C.

Недавно мы исследовали влияние числа плоскостей InGaAs-КТ (N) на структурные, оптические свойства и параметры лазерной генерации в структурах с InGaAs-GaAs-ВМСКТ, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs (100) и введенных в активную область AlGaAs-GaAs-КПСР лазеров с КЯ. Мы обнаружили, что связанные точки формируются посредством эффекта самоорганизованного преобразования формы, заключающегося в передаче материала InGaAs из нижней к верхней КТ и его замещении GaAs. Поперечный размер и объем верхних КТ неизменно увеличивается с N . Для большого N в вертикальном направлении формируется сверхрешетка на КТ (рис. 16).

Увеличение N ведет к существенному уменьшению J_{th} при 300 К из-за увеличения фактора оптического ограничения (от 900 А/см² для $N = 1$ до 260 А/см² для $N = 6$ и до 90 А/см² для $N = 10$). В то же время при комнатной температуре длина волны излучения увеличивается с N , достигая длины волны фотолюминесценции при низких плотностях возбуждения (1.05 мкм, 300 К, $N = 10$), а T_0 вблизи комнатной температуры возрастает от 60 К ($N = 1$) до 150 К ($N = 10$). В то же время область высокой T_0 при низких температурах сужается, свидетельствуя о формировании мини-зон из-за образования вертикальной КПСР в случае большого N .

Я включил это чуть более детальное описание разработки лазерной структуры на КТ также для того, чтобы показать, насколько сложным и совершенным является путь реализации принципиальных преимуществ КТ. Позвольте суммировать эту часть таким же образом, как это было сделано для других частей.

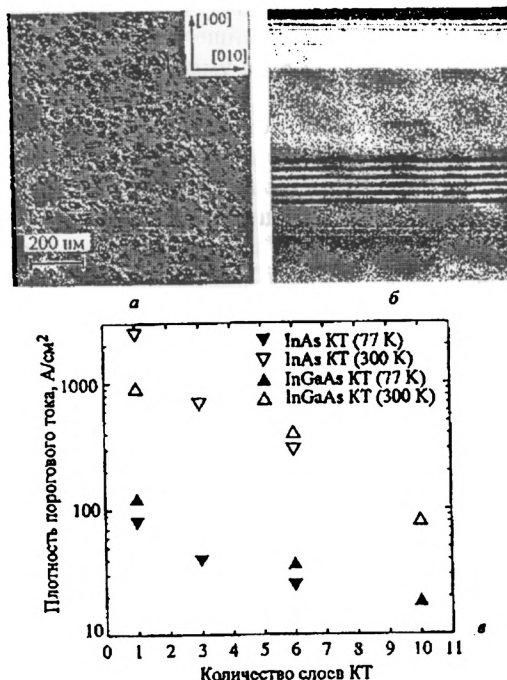


Рис. 16. ПЭМ изображения с поверхности (а) и с торца (б) структуры с шестью плоскостями вертикально связанных КГ и зависимость пороговой плотности тока от числа плоскостей КГ в активной области лазера на КТ (в)

I. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками:

- Одномерный электронный газ (КП).
- Функция плотности состояний с острыми максимумами (КП).
- Нуль-мерный электронный газ (КТ).
- Функция плотности состояний типа 5-функции (КТ).
- Увеличение энергии связи экситона.

II. Важные следствия для применений в полупроводниковых приборах:

- Уменьшенное значение порогового тока лазера и увеличенное дифференциальное усиление, уменьшенная температурная зависимость порогового тока (КП), температурная стабильность порогового тока (КТ), дискретный спектр усиления и возможность получения

рабочих характеристик, подобных характеристикам твердотельных или газовых лазеров (КТ).

– Более высокий коэффициент модуляции в электрооптических модуляторах.

– Возможность создания «одноэлектронных» устройств.

– Новая возможность для развития полевых транзисторов.

III. Важные технологические особенности:

– Применение для роста эффектов самоорганизации.

– Эпитаксиальный рост в V-канавках.

– Литография высокого разрешения и травление структур с квантовыми ямами.

Будущие тенденции

Недавно были получены впечатляющие результаты для коротковолновых источников излучения на основе селенидов $A^{IV}B^{VI}$ и нитридов $A^{III}N$. Использование гетероструктурных концепций и методов роста, которые были разработаны для КЯ и СР на $A^{III}B^V$, в большой степени определило успех этих исследований. Естественная и наиболее предсказуемая тенденция – применение гетероструктурных концепций и технологических методов к новым материалам. Разработанные недавно различные гетероструктуры $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$ являются хорошими примерами этого утверждения.

С более общей и глубокой точки зрения гетероструктуры (это касается всех из них: классических, КЯ и СР, КП и КТ) представляют собой способ создания новых типов материалов – гетерополупроводников.

Классические гетероструктуры, квантовые ямы и сверхрешетки уже весьма совершенны, и мы используем многие из их уникальных свойств. Структуры же с квантовыми проволоками и точками пока еще очень молоды: на этом пути нас ожидают захватывающие открытия и новые неожиданные применения. Уже сейчас мы можем сказать, что упорядоченные равновесные массивы квантовых точек могут использоваться во многих устройствах: лазерах, оптических модуляторах, детекторах и эмиттерах в дальней инфракрасной области и т. д. Резонансное туннелирование через полупроводниковые атомы, внедренные в более широкозонные слои, может приводить к значительному улучшению характеристик приборов. В более широком смысле структуры с КТ будут разработаны как «вширь» так и «вглубь». «Вширь» подразумевает новые материальные системы, способные перекрывать новые диапазоны энергетического спектра.

Наиболее развитая система InGaAs-GaAs уже нашла применение для значительного усовершенствования характеристик полупроводниковых лазеров. Недавно квантовые точки II рода GaSb-GaAs были сформированы на поверхности GaAs (100). Подобная концепция образования КТ работает и в системе InSb-GaSb, делая квантовые точки потенциально привлекательными для применения в лазерах средней инфракрасной области спектра. Проблемы, связанные со сроком службы полупроводниковых зеленых и синих лазеров, и даже более общие проблемы создания структур, свободных от дефектов, на основе широкозонных полупроводников A^{III} и нитридов $A^{III}N$, весьма вероятно, могут быть решены при использовании структур с КТ в этих системах.

«Вглубь» подразумевает понимание того, что степень упорядоченности в значительной степени зависит от очень сложных условий роста, констант материалов, конкретных значений поверхностной свободной энергии. Путь к резонансно-туннельным и одноэлектронным приборам и устройствам – глубокое и тщательное исследование и оценка этих параметров с целью достижения максимально возможной степени упорядоченности. В целом необходимо найти более сильные механизмы самоорганизации для создания упорядоченных массивов КТ. Связанные массивы самоорганизованных КП и КТ весьма перспективны для поперечных сверхрешеток Есаки – Тсу. Вертикально связанные точки можно представить как одномерную сверхрешетку – совершенно новый объект исследований.

Едва ли возможно отразить в докладе даже все основные направления современной физики и технологии полупроводниковых гетероструктур. Их намного больше, чем было упомянуто. Многие ученые внесли свой вклад в этот впечатляющий прогресс, который не только определяет в значительной степени будущие перспективы физики твердого тела, но в каком-то смысле также и будущее человеческого общества. Я хотел бы также особо подчеркнуть роль ученых предыдущих поколений, тех, кто подготовил наш путь. Я счастлив, что имел возможность работать в этой области с самого начала. Я счастлив, что могу продолжать эту работу сейчас.

* Лекция на основе статьи в журн.: Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. С. 3–18.